

仪器仪表中的 接地与屏蔽技术

中国人民解放军昆字二一一部队编辑组

仪器仪表中的 接地和屏蔽技术

Ralph Morrison 著
龙 忠 琪 译

中国人民解放军昆字二一一部队编辑组

1 9 7 3

译者序

本书系根据美国“*Grounding and shielding Techniques in Instrumentation*”一书译出。作者以其在“力学仪器制造公司”多年的工作实践为基底材料写出了这本书。本书专题讨论仪器中的接地和屏蔽问题，从理论上讲，绝大多数的这类问题只是简单的欧姆定律问题，然而在实际处理上却并非是一件容易的事。书中给出的分析方法、屏蔽技术和基本法则等基本思想对从事有关电气电子设备、无线电仪器仪表等研究设计和制造工作的人员都有一定的参考价值。到目前为止，讨论这类问题的论著尚见不多。遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，译者不顾学识浅薄译出了这本书，供有关同志参考。其中错误之处定会很多，切望读者批评指正。

一九七三年四月

目 录

引言 静电屏蔽	(1)
一、静电学	(5)
二、电容量和能量存贮	(22)
三、静电学在实际过程中的应用	(30)
四、仪器的实际屏蔽	(38)
五、差分放大器	(55)
六、一般应用问题	(73)
七、电阻电桥系统中的屏蔽	(94)
八、仪器中的磁过程	(103)
九、仪器中的射频过程	(125)
十、大地平面	(142)

在 1 欧姆上流过 1 微安的电流产生 1 微伏的电位降。

G.S. 欧姆 1789—1854

引言 静电屏蔽

静电屏蔽几乎包括了电子学中的全部接地和屏蔽问题。静电屏蔽不是那么简单，设计人员或使用者优先理解它的功能似乎也还有一段距离。这可能是因为要讨论的电路图不够明确，并且难以画出之故。由于不明确，决定问题之前往往先避开这些问题，结果使问题变得复杂起来。因为所有接地和屏蔽现象都有一种简单的解释，可以避开作深入的研究，但屏蔽和接地问题是可以放在可靠的基础之上的。

电阻、电容和电感的概念在第一年的物理学或电子学课程中讲过。这些概念步步深入地反复讨论，其符号一直没变。电阻用齿形线表示，电容用粗平行线表示，相互联结用直线表示。这种表达方式有好处但也是产生麻烦的原因。一旦电路形成，其分析是常规的。如果问题由寄生参数和分布参数致成，就很难画出电路，于是也就很难根据分析得到任何有用的见解。

电气屏蔽的基本电特性是分布性质的。这本来是显而易见的，可是静电屏蔽与电缆、功率变压器和电子部件这样的元件有关。系统中有限个点是欧姆联结，并且它还以分布方式经电容耦合到它区域内的无穷多个点。这就是彻底解决问题所必须考虑的互相关联的结构。

总体问题的理解永远寓于其各组成部件的理解之中。静电

DAP 05/08

屏蔽也不例外，支配它行为的规律性同支配一切电气行为的规律性一样。因为这一类的物理学问题文献中已有很多，所以大概地复习和讨论一下它与这里的问题的关系对本书即已足够。讨论有时似乎是很基本的，但是往往这正是难点。最简单的东西常常由于显而易见而被忽略，而这些所谓琐碎的细节后来反会引起麻烦。如果密切注意非常简单的概念，就可能在其统观上了解并欣赏静电屏蔽的功能。尤其必须注意这些概念之间的相互关系。

自从第一个真空三级管问世，对仪器制造学的要求越来越高了。随着仪器制造学的成长提出了高精度、大带宽与远距离信号传输进行耦合等要求。数据通道的数量不断增多，于是系统设计者的担子更重了。

仪器制造学问题实际上都是电子学问题。麦克风通过混频器与音频放大器相联，同导弹和磁带录音机之间接加速计传感器属于一样的仪器制造学问题。与麦克风和加速计有关的很多问题都是相同的。信号从一块电路板耦合到另一块电路板在技术上是仪器制造学问题，因此，后面各章讨论之材料，不管处理什么信号都是适用的。

仪器制造学中的接地和屏蔽问题的处理，同选取合适的指标一样地重要。如果这一方面没有正确地加以考虑，噪声和共模效应就会造成严重的数据误差。不正确的屏蔽和接地不一定会带来麻烦，如处理大信号或用短电缆布线可能就不出现明显问题。然而重要的是要知道处理屏蔽和电缆的正确途径，以免在需要考虑之时找不到正确的解决办法。

决定仪器制造问题的指标是带宽、信号电平和精度。1945年以前直流放大器尚未被经常采用，而是用直流电流计记录或用车载波激励应变仪。这些技术能很好地解决问题有几个原因：

直流电流计记录虽精度和带宽受到限制，但信号不需要放大，这意味着电子部件很少，特别是接地和屏蔽问题还不成熟；载波激励应变仪系统采用耦合变压器，可以对最佳信号——噪声特性进行阻抗匹配，其中更重要的因素是变压器可以不进行公共联结就能耦合信号。

信号公共通路的这种断路在1945年的第一个直流放大器中是不具备的。这一事实便使系统设计者的问题大大复杂起来。这些直流放大器的确比较精确，并且带宽也较大，但并不能永远如期工作。屏蔽和接地问题就负责解决大部的这类困难。

虽然直流放大器能够提供精度、带宽和增益，但不像买仪器设备并将其接于换能器和记录器之间那样简单。处理信号的每一部分必须仔细检查，包括电缆、接插元件、屏蔽联结、接地点以及放大器和记录器，甚至这还不完全。每一部分都在系统之意义上互相关联，也须仔细考虑。一个良好的仪器放大器与一个完美无缺的电缆，如果联结不当也不会正确工作。一个仪器放大器即使在某个系统应用中工作良好，但在另一个系统应用中则可能是不可接受的。

自从1958年以来，半导体的发展给仪器设计者提供了一些极好的晶体管元件。这些元件已使高质量仪器差分直流放大器的发展成为可能。如果正确应用的话，这些器件将克服单端放大器中出现的多数困难，尤其是它的公共联结。然而，这些仪器的应用并未解决复杂性问题。如果系统屏蔽和接地不正确，差分放大器将不会给出满意的结果。

似乎有一个普遍的定理适用于一切进展，即每一种改进都带来额外的负担：直流放大器带来了精度，但增加了公共信号联结；差分放大器消除了这种公共联结，但其正确应用需要对屏蔽和接地过程有一个清晰的理解。当然，系统的要求将继续

发展，前进中的每一种新仪器或新技术都会促进前进，但也增加了负担。通常，在涉及到新技术时要很好地进行根本性的理解，以免走回头路。本书的目的就是想为方便地打开通路提供一些必要知识。

一、静 电 学

静电屏蔽和静电能量存贮物理学是不可分割的。同电容的基本概念一样，许多共同的静电效应被忽视或者没有被理解。这一部分的目的是复习这些基本概念，以便不要忘记将这些概念与手边的问题联系起来。

电 荷

电荷的基本单位是库仑。如果电荷在导体中以均匀速度流动，每秒流过某给定点 1 库仑的电荷，就叫做流过 1 安培。库仑是一个大单位。 6.28×10^{18} 个电子组成的负电荷等于 1 库仑。实际上，通常以微微库仑或微库仑来论及电荷。微微库仑是 10^{-12} 库仑，微库仑是 10^{-6} 库仑。

电荷之间的作用力

可以用各种各样的试验来证实带电物体之间存在着引力或斥力。如果把一些剩余电子置于两个物体上，它们就叫做带了负电，这些物体将互相排斥。如果从两个物体中把电子移出去，它们就叫做带了正电，这些物体也将互相排斥。用带相反电荷的物体试验表明，此时物体互相吸引。

两个带电体之间的静电力 f 正比于它们的电荷之乘积，反比于它们之间的距离之平方。在不考虑单位时用数学表示即为

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1)$$

如果电荷符号相同，乘积为正，表示作用力相斥。

两个带电体之间的作用力随着它们所处的不同介质而变化，这些作用力在真空中最大。力减小的程度是衡量介质介电常数 k 的尺度。两个带电体之间的作用力的正确公式是

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{r^2 k} \quad (2)$$

电 场

带电体之间的互相作用产生了电场的概念。电场图说明了带电体周围的电力的性质。表明电场特征的有两个东西，一个是对试验电荷的作用力，一个是它们的作用方向。必须用试验电荷测量电场的强度。加上的这个电荷必须很小，否则试验电荷的存在就会影响被测场的特征。

如果把电荷 Q_1 放到一个置于真空中的小球上，力场就将全部指向球的中心。并且试验能够表明，这些力随着至球心的距离 r 之平方成反比变化，与球上的电荷 Q_1 成正比。我们用这两个量定义被测电场 E ，因此在电介质中我们得到

$$E = \frac{Q_1}{k r^2} \quad (3)$$

其中 E 沿 r 指向。

式 (2) 中的力 f 可以用式 (3) 中的电场 E 表示，代入之

$$f = Q_2 \left(\frac{Q_1}{k r^2} \right) = Q_2 E \quad (4)$$

表达式 (4) 说明，场强 E 是力 f 的直接度量，其比例系数为试验电荷 Q_2 。如果设 Q_2 等于 1，则 f 和 E 相等。换句话说，场强

E 就是对单位电荷的作用力。 E 的矢量方向同该力的方向相同。

电 压

如果电荷在电场 E 中移动，则必须对电荷做功以产生位移。例如，如果对电场中的电荷的作用力是1达因，电荷移动1厘米则对电荷所做的功是1达因一厘米，即1尔格。做功的大小决定于场强 E 及其中的电荷 Q 。用单位电荷测量功非常方便，因为对任何给定的电荷 Q 用简单的乘法即可求得功。

根据定义，把单位电荷从静电系统中的一点移动到另一点所需的功用伏特单位来计量。上面定义的单位电荷往往引起一个概念性的困难。为实地测量两点之间的电压，必须用小的试验电荷。试验电荷必须十分小，它的存在不致改变被测电场。相应地功也小，不过，每单位电荷的功可以容易地计算出来。

单位电荷在静电系统中的两点之间移动所需的功类似于升起重物的力学问题，如1英磅的重物升高10呎，产生这个变化消耗了10呎一英磅的功。这个位能与重物升高到该新的位置所走的路径无关。

我们能准确模仿以上情况。如果我们在两点之间移动单位电荷做10伏的功，所做的功就与做功所走的路径无关。在这一方面，电场和重力场是一样的。具有这种特征的场叫做保守场。提高重物势能的概念可以不走样地移植到静电的场合中，把电压差这个术语称为电位差也是可以的。如果电荷被移向高位能点，就说它的电位或电压升高了。

电压梯度

山或丘陵在给定点的陡度是衡量它们的位梯度的尺度。该

陡度可以用水平每移动 1 呎与所增加的位能之比来度量。水平移动的方向应当与上升最陡的方向相应。

在电的情况下，电场中的电荷 Q 移动时位能变化。如果移动沿场 E 方向，位能增加的速度最大，因此位能变化最大的方向是沿场 E 的方向。依照我们前面的推论，根据每单位电荷在电场方向上移动单位距离位能的变化，我们就能够测得电位梯度，这就是电压变化同移动的距离之比。用微分形式表示，梯度 G

$$G = \frac{\Delta V}{\Delta x} \quad (5)$$

其中 x 沿 E 的方向。

ΔV 项是每单位电荷的微分电压或微分功。因为 $\Delta V = G \Delta x$ ，所以后者也可以用单位电荷的微分功来表示。如果把 G 表示成每单位电荷所受的力，则单位全部正确，即

$$\Delta V = \frac{\Delta \text{功}}{\text{单位电荷}} = \frac{\text{力}}{\text{单位电荷}} \cdot \Delta x = G \Delta x \quad (6)$$

因此， G 等于单位电荷所受的力，这正好就是电场一节中给出的 E 的定义。我们可得出结论，场 E 就是电压梯度。它是电荷 Q 所呈现的电位山的陡度的量度。更精确地说

$$E = \frac{dV}{dx} = \text{梯度 } V \quad (7)$$

其中 x 是变化最大的方向。

带电球形导体

在前几节中讨论了移动电场 E 中的电荷所需的功，但讨论

这些电场没有参考实际的电荷分布。由于电荷必定存在于导体和绝缘体之内或之上，所以更详细地了解这些分布是重要的。

要讨论的最简单的系统是单个导电球。当电荷 Q 置于球的表面上时，在球的外面有一个电场 E 。电场 E 处处成辐射状，并且幅度由下式给出

$$E = \frac{Q}{k r^2} \quad (8)$$

把一个小电荷 ΔQ 从无穷远处移到这个球的表面所需的功 W ，等于力在距离上的积分。

$$W = - \int_{\infty}^r \frac{Q \Delta Q}{k r^2} dr = \frac{Q \Delta Q}{kr} \quad (9)$$

为了求出无穷远处和球表面之间的电位差，必须将这个功与单位电荷联系起来。用 ΔQ 除式 (9)，我们求得电位差

$$\frac{W}{\Delta Q} = V_D = \frac{Q}{kr} \quad (10)$$

如果规定无穷远处的电位为零，球表面上的电位由式 (10) 给出。

描绘这种球的载荷能力是很方便的。因为根据式 (10)，电荷和电位成正比，电荷与电压的比值只与几何特性有关。该比值叫做球的电容量。球的这个比值等于

$$C = \frac{Q}{V_D} = Q \left(\frac{kr}{Q} \right) = kr \quad (11)$$

电容量可以认为是度量每单位电位差的载荷能力的尺度。式

(11) 简明地告诉我们，半径为 $2r$ 的球的表面上的电荷等于半径为 r 的球的两倍，假定二者电位相等的话。

导体周围的电场

上面讨论的球有一个从其表面至无穷远处的电场 E 。这个体系的位能可以认为是贮存在无穷大的电场 E 中。这一思想在概念上非常重要，但是球并不是仪器制造学中出现的几何形状的再现。

在讨论比较复杂的表面之前，必须较为详细地研究一下电场 E 。首先研究一个具有内电场 E 的导体，它具有的有效自由电荷是电子。这些电子将在电场的方向上得到加速，由于碰撞之故假定有一个平均速度。这就是说导体中流着电流。因为我们论及的是静态过程，所以我们只局限在电流或电压运动全都为零的状况下。那末很清楚，在有关静电荷的问题中导体内的电场 E 必定为零。电场 E 只能存在于表面上但是不能穿过表面。这就是说，产生电场的电荷必然只存在于表面上。这是人们能够得到的唯一的逻辑推论。在给导电球充电时，表面上的电荷必定在整个表面上均匀分布。

电场 E 对任何导体都必然垂直于它的表面，否则就会有电场的切线分量，从而产生面电流。因为在静态过程中这是不可能的，所以电场必定离开表面且垂直于表面。

位移场 D

由电荷体系产生的电场 E 会因介质材料的存在而减小。式(8)给出了处于介电常数为 k 的介质中的导电球的电场 E 。若描绘一个仅仅由建立电场的电荷产生的新电场 D 是很方便的。因为两个电场同时产生，所以 E 如果已知就可以算出 D ，

或者 D 已知算出 E 。对于式(8)的球,场 D 由下式给出

$$D = \frac{Q}{r^2} \quad (12)$$

注意,介电常数没有作为一个因子出现,所以很显然,球外处处

$$D = kE \quad (13)$$

在真空中 $k = 1$,位移场同电场相等,即

$$D = E \quad (14)$$

场的表示法

静电学中的电场类似于力学中的重力场。在自由空间中,这些场是连续的,即处处存在。这些场最好表示成与作用于试验电荷的力的方向一致的直线或曲线。这些线往往叫做 E 或 D 的力线或通量线。图1表示球形带电导体周围的辐射场。离开球的力线或通量线的数量正比于球上的电荷。显然这个比值是任意的。每单位电荷可以是一根力线,但是为了表示出一个有意义的力场图象可能必需用另一种比值。同样根据惯例,通量

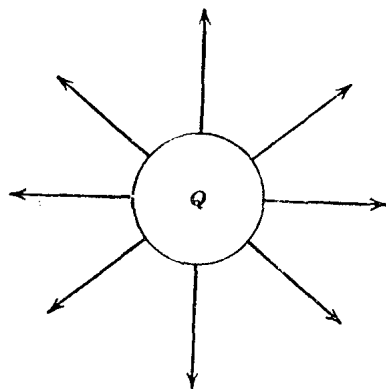


图1 表示带电球周围电场 E 的力线

线离开正电荷终止于负电荷。

场的另一种表示法即通量管法。同力线从表面辐射出去的方式很相像，如图 2 所示，通量管离开球心的半径为 r_1 。这些管必须复盖整个球面，并包容从球出发的整个场。在较大的半径 r_2 上，这些管必定扩大并以连续的方式复盖更大的表面面积。这种扩大是径向距离增大电场变弱的尺度。表面 S_1 或 S_2 上的通量密度（每单位面积通量）乘以面积 S_1 或 S_2 必为常数。这是表示穿过 S_1 进而穿过 S_2 的同一个通量的另一种方法。

与这种要求相应的通量定义是

$$dN = D ds \quad (15)$$

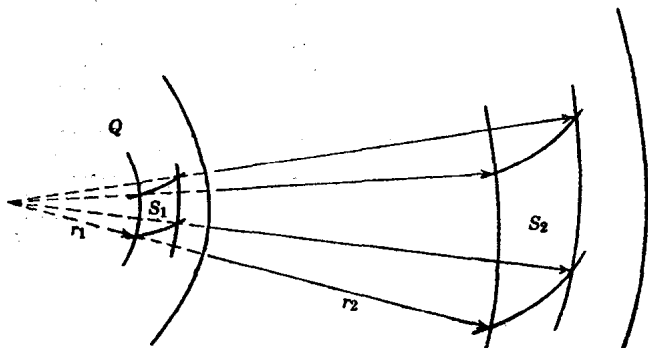


图 2 从带电球表面出发的通量管

其中 dN 是垂直穿过单元表面面积 dS 的增量， D 是电荷在这一点产生的位移场。如若将该场定义应用于图 2 的球，就得到一个重要定理。球的整个表面上的总 N 可以用积分法求得。因为 D 永远垂直于表面，积分就是

$$\int_S D dS = 4 \pi r^2 D = N \quad (16)$$

不过我们知道

$$D = \frac{Q}{r^2} \quad (17)$$

因此得

$$N = 4 \pi r^2 \left(\frac{Q}{r^2} \right) = 4 \pi Q$$

该式表明，带电球发出的总通量为 $4 \pi Q$ 。该通量可以在任何半径 r 上测得。同样我们看到，通量如所理想的那样正比于电荷 Q ；就是说，只有存在电荷才有通量存在。从球发出通量的概念能够引伸到任何包含电荷的区域都发出通量。用最一般的术语就是说

$$\int_S D \cdot dS = 4 \pi Q \quad (18)$$

其中 S 是任意闭合表面，并且注意，对所有 D 和 S 都是点积。以上论述叫做高斯电通量定理。

难 点

前节的球便于讨论基本概念而不带来过分的数学复杂性。在其它几何体中，电荷分布可能是不均匀的，或者场在数学计算上不是简单的，但其概念仍然不变。

概念上的困难出现了，应当加以论述。带电荷 Q 的球其电场 E 不增大到无穷大，半径便不可能减小到零。在任何实际装置中，至少有微量电荷存在。如果不管无穷大 E 电场的物理意义如何，点电荷是不引起什么问题的。分布在球表面上的电荷产生一个电场，该电场与置于球中心的点电荷产生的电场是不